

## WRF-CMAQ 결합모형을 이용한 에어로졸 피드백 효과가 한반도 일사량에 미치는 영향 연구

### Effect of Aerosol Feedback on Solar Radiation in the Korean Peninsula Using WRF-CMAQ Two-way Coupled Model

유정우 · 박순영<sup>1)</sup> · 전원배<sup>1)</sup> · 김동혁<sup>2)</sup> · 이화운\* · 이순환<sup>3)</sup> · 김현구<sup>4)</sup>

부산대학교 지구환경시스템학부, <sup>1)</sup>부산대학교 환경연구원, <sup>2)</sup>충남연구원,  
<sup>3)</sup>부산대학교 지구과학교육과, <sup>4)</sup>한국에너지기술연구원 신재생에너지 지원센터  
(2017년 5월 30일 접수, 2017년 6월 21일 수정, 2017년 7월 27일 채택)

Jung-Woo Yoo, Soon-Young Park<sup>1)</sup>, WonBae Jeon<sup>1)</sup>, Dong-Hyeok Kim<sup>2)</sup>,  
HwaWoon Lee\*, Soon-Hwan Lee<sup>3)</sup> and Hyun-Goo Kim<sup>4)</sup>

*Division of Earth Environmental System, Pusan National University*

<sup>1)</sup>*Institute of Environment Studies, Pusan National University*

<sup>2)</sup>*Seohaean Research Institute, ChungNam Institute*

<sup>3)</sup>*Department of Earth Science Education, Pusan National University*

<sup>4)</sup>*Korea Institute of Energy Research*

(Received 30 May 2017, revised 21 June 2017, accepted 27 July 2017)

#### Abstract

In this study, we investigated the effect of aerosol feedback on PM<sub>10</sub> simulation using a two-way coupled air quality model (WRF-CMAQ). PM<sub>10</sub> concentration over Korea in January 2014 was simulated, and the aerosol feedback effect on the simulated solar radiation was intensively examined. Two PM<sub>10</sub> simulations were conducted using the WRF-CMAQ model with (FB) and without (NFB) the aerosol feedback option. We find that the simulated solar radiation in the west part of Korea decreased by up to  $-80 \text{ MJ/m}^2$  due to the aerosol feedback effect. The feedback effect was significant in the west part of Korea, showing high PM<sub>10</sub> estimates due to dense emissions and its long-range transport from China. The aerosol feedback effect contributed to the decreased rRMSE (relative Root Mean Square Error) for solar radiation (47.58% to 30.75%). Aerosol feedback effect on the simulated solar radiation was mainly affected by concentration of PM<sub>10</sub>. Moreover, FB better matched the observed solar radiation and PM<sub>10</sub> concentration than NFB, implying that taking into account the aerosol direct effects resulted in the improved modeling performance. These results indicate that aerosol feedback effects can play an important role in the simulation of solar radiation over Korean Peninsula.

**Key words** : WRF-CMAQ two-way coupled model, aerosol feedback, solar radiation, rRMSE

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)51-583-2651, E-mail : hwlee@pusan.ac.kr

## 1. 서 론

에어로졸이 대기환경 및 기후변화에 미치는 영향은 크지만 화학반응-에어로졸-구름-복사 간의 feedback 메커니즘이 복잡하고 그 영향에 대한 불확실성이 매우 크다(Jacob and Winner, 2009; Zhang, 2008; IPCC, 2007).

일반적으로 에어로졸은 지표면으로 도달하는 일사량에 영향을 끼쳐 지표면 온도를 감소시키고 대기경계층 성장을 억제시킨다. 이외에도 습도 증가와 대기를 안정시키는 역할도 하는데 이를 에어로졸의 직접 효과(direct effect)라 한다. 또한 에어로졸이 CCN(Cloud Condensation Nuclei) 역할을 함으로써 구름 방울의 크기는 감소하는 반면 수농도(number concentration)와 수분 및 구름 영역, 하층운의 life time이 증가하여 결과적으로 강수량에도 영향을 끼치는데 이를 에어로졸의 간접 효과(indirect effect)라 한다.

이러한 에어로졸의 feedback 효과는 장기간의 기후 변화뿐만 아니라 국지 규모의 기상 및 대기질에도 영향을 끼칠 수 있다. Jacobson *et al.*(2007)은 에어로졸에 의해서 지표면 도달 일사량과 지표면 온도, 풍속의 감소와 상대습도 및 AOD(Aerosol Optical Depth), COT(Cloud Optical Thickness) 등이 증가함을 보였다. Zhang(2008)은 미국 텍사스 지역을 중심으로 WRF/Chem(Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry) 모델을 이용한 연구를 통해서 에어로졸을 고려함으로써 지표면 온도가 평균적으로 0.18°C 감소함을 보였다. Fokel *et al.*(2012)은 반 직접 효과(semi-direct effect)에 의한 구름 영역의 변화를 보였으며, 간접 효과에 의해서 구름의 수분 함량이 확연히 감소함을 보였다. Werner *et al.*(2016)은 WRF/Chem 모델을 이용한 연구에서 에어로졸의 직접 효과만을 고려한 결과 2.0~8.0 W/m<sup>2</sup>의 일사량 감소와 대기경계층 성장의 억제로 인한 PM<sub>10</sub> 농도의 증가(1.9 µg/m<sup>3</sup>)를 확인하였으며, 직접 효과와 간접 효과를 모두 고려한 결과에서도 이와 유사한 결과를 보였다. 이상의 연구들로 미루어 볼 때 에어로졸의 feedback 효과로 인해 기상 수치모의 결과의 정확도뿐만 아니라 대기질 모델의 PM<sub>10</sub>을 포함한 에어로졸의 수치모의 정확도가 개선됨을 알 수 있다. 그러나 국외의 경우는 많은 선행연구들이 존재하지만 국내를 대상으로 한 에어로졸의 feedback 효과에 관한 연구들은 상대적으로 부족한 실정이다.

최근 개발된 WRF(Weather Research and Forecasting)-CMAQ(Community Multi-scale Air Quality) two-way coupled system은 에어로졸의 feedback 효과를 고려할 수 있으며 기존의 독립적으로 개발되어 오던 기상 모델인 WRF와 대기질 모델인 CMAQ의 일관성을 유지할 수 있다는 장점이 있다(Wong *et al.*, 2012). 현재 개발된 WRF-CMAQ 결합 모델은 에어로졸의 직접 효과만을 고려할 수 있다. 에어로졸 직접 효과에 의한 일사량 변화는 기온 감소 및 대기경계층 성장 억제, 풍속 감소와 같은 기상 변화뿐만 아니라 광분해율과 이류 및 확산의 변화를 통해 대기질에도 영향을 끼칠 수 있다. 선행연구(Hogrefe *et al.*, 2015; Kong *et al.*, 2014; Wong *et al.*, 2012)들을 통해서 에어로졸 feedback 효과로 인한 기상 및 대기질 수치모의 정확도가 향상되는 것이 밝혀졌다. 따라서 본 연구에서는 WRF-CMAQ 결합모델을 이용한 기상 및 대기질 수치모의를 통해 에어로졸 feedback 효과가 한반도에 일사량 변화에 미치는 영향에 대해서 정량적으로 분석하였다.

## 2. 연구 방법 및 실험 설계

본 연구에서는 에어로졸에 의한 복사에너지의 영향을 살펴보기 위해서 그림 1과 같이 동아시아를 포함한 한반도 전체를 대상 지역으로 선정하였으며, 수평해상도 27 km (120×130)인 도메인1과 수평해상도 9 km (178×169)의 도메인2로 설정하고 연직 격자는 총 30개 층으로 구성하였다.

본 연구에서 사용된 모델은 미국 국립 기상연구소 NCAR(National Center for Atmospheric Research)와 미국 해양대기관리청 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 국립환경예측센터 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 개발한 3차원 중규모 기상 모델인 WRFv3.4와 미국 환경보호국 EPA(Environmental Protection Agency)에서 개발한 3차원 광화학 수송모델인 CMAQv5.0.2을 이용한 WRF-CMAQ 결합모델(Wong *et al.*, 2012)의 two-way system을 사용하였다. 본 시스템은 CMAQ에서 모의된 에어로졸의 성분 및 질량, 크기 분포를 바탕으로 에어로졸의 특성을 온라인으로 기상 모델인 WRF에 feedback 해줌으로써 에어로졸의 영향을 고려한 기

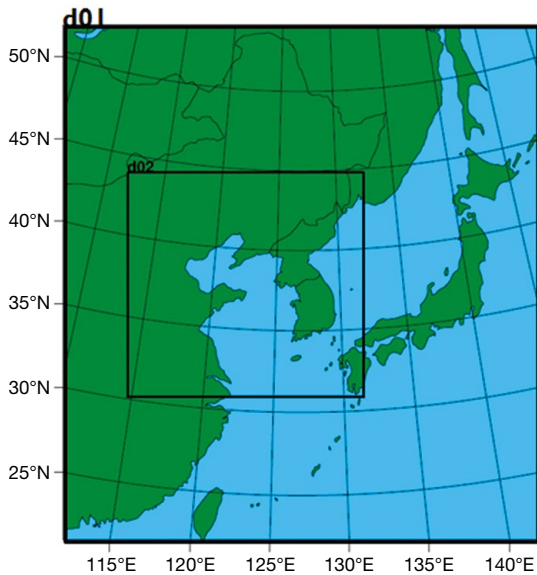


Fig. 1. Domain configuration for WRF model simulations used in this study.

상 수치모의 결과를 계산할 수 있으며, WRF와 CMAQ의 수치모의 적분 시간(time step) 비율은 5:1로 설정하였다. 단파 및 장파 복사 모수화 방안은 RRTMG 방안(Iacono *et al.*, 2008)을 적용하였다.

WRF 모델의 초기 및 경계자료는 NCEP에서 6시간마다 제공되는 공간해상도  $1^\circ \times 1^\circ$ 의 FNL(Final Operational Global Analysis) 자료를 사용하였으며, 해수면 온도 자료는 NCEP/MMAB(Marine Modeling and Analysis Branch)에서 AVHRR/NOAA-17의 위성과 부이 및 선박자료 등의 관측자료를 자료동화하고(Thiebaut *et al.*, 2003), 미국의 NCEP의 현업모델에서 사용하고 있는 RTG\_SST(Real Time Global Sea Surface Temperature) 일평균 자료 중 공간해상도  $0.083^\circ \times 0.083^\circ$  자료를 사용하였다. 또한 기상 및 대기질 수치모의 정확도 향상을 위해서 기존의 배경장과 격자점간의 차이를 완화시켜 오차를 줄일 수 있는(Bowden *et al.*, 2012) 분석 넛징(analysis nudging) 자료동화 기법을 적용하였다. 분석 넛징에 사용된 변수는 바람( $u, v$ ), 기온( $t$ ), 수증기 혼합비( $q$ )이며 동화 계수는 기본값인  $0.0003 \text{ s}^{-1}$ 으로 설정하여 6시간 간격으로 실시하였다.

CMAQ 모델의 수치모의에 사용된 배출량 자료로는 동아시아 배출량인 INTEX-B(The Intercontinental

Chemical Transport Experiment -Phase B) 2006년 자료를 이용하였다. INTEX-B 자료는 BC, CO, NO<sub>x</sub>, OC, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, VOCs 총 8가지 물질에 대한 배출량 정보를 제공하며, NH<sub>3</sub> 배출량 정보는 EDGAR(The Emissions Database for Global Atmospheric Research) 2008년 자료를 사용하였다. 2014년 1월은 황사가 나타난 1월 1일을 포함하여 전국 월평균 PM<sub>10</sub> 농도가  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 매우 높게 나타나 에어로졸 feedback 효과에 의한 일사량 변화를 분석하기에 적합하다고 판단된다. 따라서 WRF 및 CMAQ 수치모의 기간을 2013년 12월 29일 0900LST부터 2월 1일 0900LST까지로 설정하여 2014년 1월 총 744시간에 대해서 분석을 실시하였다.

한반도를 대상으로 에어로졸이 태양복사에너지에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 WRF-CMAQ 결합모델에 에어로졸의 직접 효과를 반영한 실험 FB(Feed-Back)과 에어로졸의 직접 효과를 반영하지 않은 실험 NFB(Not FeedBack)을 수행하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 PM<sub>10</sub> 수치모의 결과 분석

우선 에어로졸 feedback의 영향을 살펴보기 위해서 상대적으로 고농도가 빈번하게 나타나는 도심 지역 중 서울의 PM<sub>10</sub> 농도를 확인하였다. 그림 2는 2014년 1월의 PM<sub>10</sub> 농도를 나타낸 것으로 서울 25개 관측망 지점을 평균한 PM<sub>10</sub> 일평균 농도를 FB 실험 결과와 비교하였다. CMAQ의 수치모의 결과가 일부 날을 제외하고 관측에 비해서 전체적으로 과소모의하는 경향이 나타났다. 그러나 고농도 발생을 잘 모의하며 전체적으로 일변화 경향성이 유사하게 나타나 높은 일치도를 보였다. 1월 중 대기환경기준치인 PM<sub>10</sub> 24시간 평균  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 날은 총 3일(1, 17, 22일)이며, 1일은 황사가 관측된 날로 본 연구에서는 황사 배출량을 고려하지 않았기 때문에 관측과 큰 차이가 났다. 17일은 PM<sub>10</sub> 농도가 약  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 관측되어 가장 높게 나타났으며, 수치모의 결과에서도 고농도가 잘 모의되었다. CMAQ 대기질 수치모의 결과가 경향성은 비교적 잘 모의하였지만 전체적으로 과소모의되는 모습이 나타난다. 이는 배출량 자료의 불확실성과 기상장 수치모의 결과의 부정확함에 의한 것으로 판단된다.

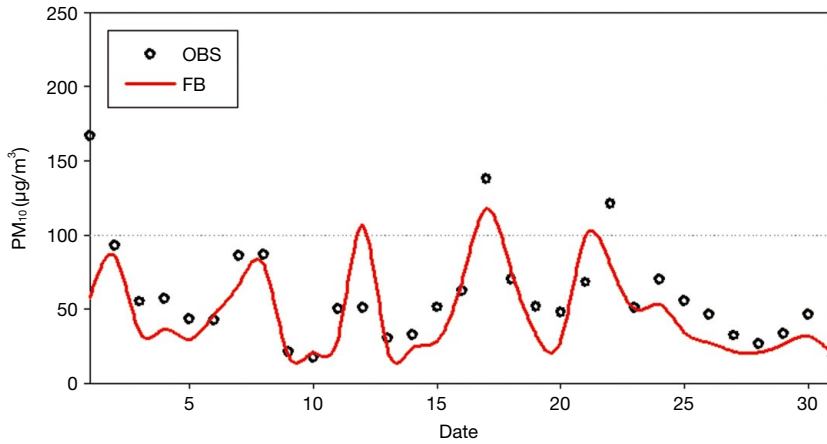


Fig. 2. Simulated FB (red line) and measured (black circle) daily mean PM<sub>10</sub> concentration at Seoul for January in 2014.

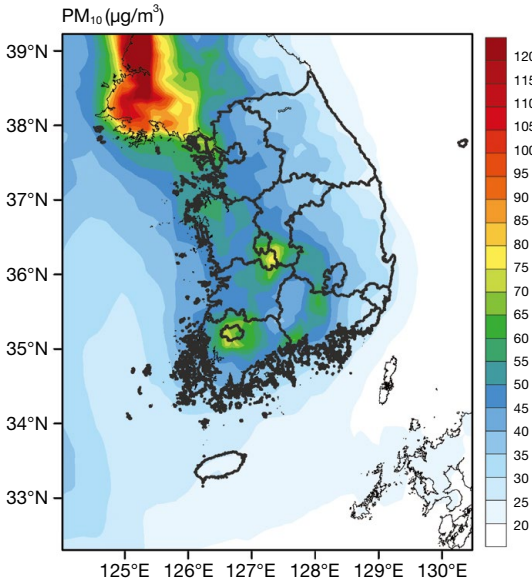


Fig. 3. Horizontal distributions of the simulated monthly mean PM<sub>10</sub> from FB for January in 2014.

그림 3은 수치모의 사례 기간인 2014년 1월 평균 PM<sub>10</sub> 농도 분포를 나타낸 것이다. 서울과 인천, 대전, 광주 등 배출원이 밀집해 있는 대도시를 중심으로 상대적으로 평균 농도가 높게 나타나 강원 및 영남 지역과는 차이를 보였다. 부산과 울산을 포함한 영남 지역은 배출원이 밀집해 있는 지역이지만, 겨울철 북서풍 계열의 바람에 의해 해안 지역에 위치한 주요 배출원

이 내륙에 영향을 끼치지 못하여 평균 농도가 낮게 나타난 것으로 판단된다. 또한, 고농도 기간에 중국이 한반도에 미치는 영향이 최대 80%로 나타나는(Koo *et al.*, 2008) 등 중국에서 편서풍 계열의 바람을 타고 넘어오는 장거리 수송의 영향이 크기 때문에 풍상 측에 위치한 한반도 서쪽 지역에서 PM<sub>10</sub> 농도가 상대적으로 높게 나타났으며, 특히 대전과 광주 지역의 경우 월평균 풍속이 2 m/s 이하로 주변 지역으로의 확산 속도가 느려 고농도가 나타난 것으로 판단된다. 이러한 PM<sub>10</sub> 평균 농도의 분포 차이로 인해서 에어로졸의 feedback 효과가 지역적으로도 차이가 나타날 수 있음을 예상할 수 있다.

### 3.2 누적 일사량 수평분포 분석

그림 4는 FB와 NFB 실험의 월누적 일사량과 FB와 NFB 실험의 차이를 나타낸 것이다. 색칠된 원은 기상청 ASOS 22개 관측지점의 월누적 일사량을 나타낸 것이다. 월누적 일사량의 전체적인 수평분포를 살펴보면 위도가 낮아질수록 일사량이 높게 분포하며 지점별 관측값에서도 이러한 분포가 잘 나타난다. 전체적으로 두 실험 모두 관측에 비해 과대모의하는 경향이 나타나지만, FB 실험에서 NFB 실험에 비해 많이 개선된 것을 확인할 수 있다. 또한, FB와 NFB 실험의 차이를 살펴보면 에어로졸의 효과를 고려함으로써(FB) 월누적 일사량이 주로 서해를 포함한 한반도 서쪽 지역(50~80 MJ/m<sup>2</sup>)에서 동쪽 지역(10~30 MJ/m<sup>2</sup>)보다 더

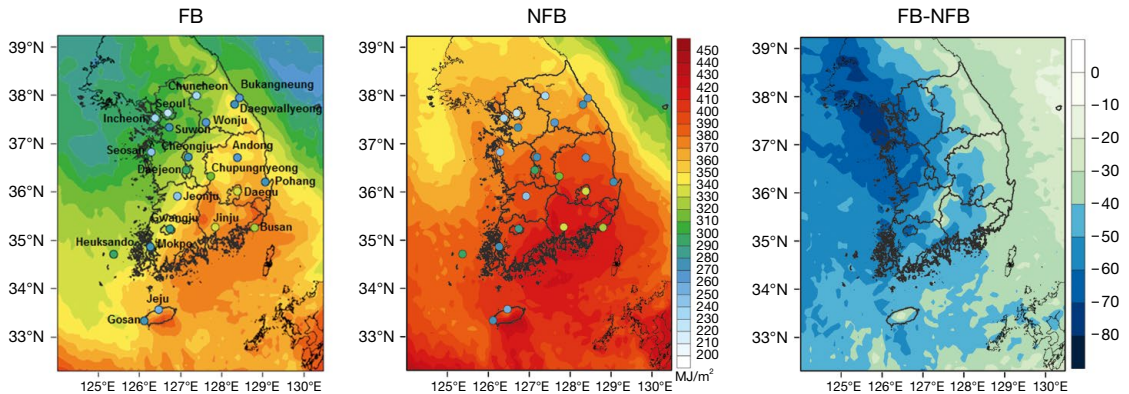


Fig. 4. Horizontal distributions of monthly accumulated solar radiation of FB (left) and NFB (center) and its difference between FB and NFB (right) with circles representing observation by 22 KMA sites for January in 2014.

크게 감소하는 것으로 나타나 에어로졸 feedback 효과에 의한 일사량의 감소가 한반도 서쪽 지역에서 두드러지게 확인된다. 이러한 분포 차이는 앞선 월평균 PM<sub>10</sub> 농도(그림 3)에서 나타난 패턴과 유사한 것으로써 고농도 PM<sub>10</sub>이 분포하는 지역과 일사량이 감소하는 지역이 유사함을 알 수 있다.

### 3.3 일사량 시계열 분석

앞서 에어로졸 feedback 효과가 일사량에 미치는 영향을 수평적 분포를 통해서 알아보았다. 이 절에서는 수치모의 기간인 2014년 1월의 일사량 시계열을 지점별로 나타내었다. 편서풍의 영향을 받는 한반도에서 서울, 인천, 대전, 광주 지점은 한반도 서쪽 풍상 측에 위치해 그림 3에서 살펴본 바와 같이 상대적으로 고농도가 나타나는 지역인 반면, 제주와 풍하 측인 한반도 동쪽에 위치한 대관령, 포항, 부산 지점은 상대적으로 PM<sub>10</sub> 농도가 낮게 나타났다.

그림 5를 살펴보면, 관측값과 비교했을 때 전체적으로 수치모의 결과가 과대모의하는 경향성이 나타났지만, 일변화 경향성을 잘 모의하고 있으며 에어로졸의 feedback 효과로 인해 일사량 모의의 정확도가 개선되는 것을 확인할 수 있다. 한반도 서쪽 풍상 측에 위치한 서울과 인천, 대전 지점은 다른 지점에 비해 시간당 최대 1 MJ/m<sup>2</sup> 이상의 차이를 보여 에어로졸 feedback 효과가 매우 크게 나타났다. 특히 전국적으로 PM<sub>10</sub> 농도가 높게 나타난 17일에 일사량의 차이가 두드러지게 나타났다. NFB 실험 결과를 살펴보면, 한반도 서쪽의

풍상 측 4개 지점 평균이 12.69 MJ/m<sup>2</sup>로 풍하 측 4개 지점 평균인 14.11 MJ/m<sup>2</sup>과 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 FB 실험에서 풍상 측 지점 평균은 7.80 MJ/m<sup>2</sup>, 풍하 측 지점 평균은 12.51 MJ/m<sup>2</sup>로 나타나 풍상 측 지점에서 평균 1.60 MJ/m<sup>2</sup>, 풍하 측 지점에서 평균 4.89 MJ/m<sup>2</sup>의 일누적 일사량 감소를 보여 지역적으로 에어로졸의 feedback 효과의 정도가 다르게 나타났다.

에어로졸 농도에 따른 에어로졸의 feedback 효과가 일사량에 미치는 영향을 알아보기 위해 그림 6에 FB 실험의 수치모의된 일평균 PM<sub>10</sub> 농도와 NFB 실험과 FB 실험의 일누적 일사량 차이를 수치모의 기간인 2014년 1월에 대해 비교하였다. 에어로졸에 의한 일사량 차이는 연직으로 분포하는 에어로졸 전체에 대한 효과가 누적되어서 나타나기 때문에 에어로졸의 전체적인 분포를 살펴봐야 하지만 자료 수집의 어려움이 있기 때문에 환경부의 PM<sub>10</sub> 관측망 자료와 비교하였다. 지점별 PM<sub>10</sub> 농도는 해당 지역(서울 25지점, 인천 15지점, 대전 8지점, 광주 7지점, 대관령은 강원 7지점, 포항 5지점, 부산 18지점, 제주 2지점)의 관측망 지점들을 평균하였다. 지역적으로 차이는 있지만 대체로 PM<sub>10</sub> 농도가 높은 날에 일사량 차이가 크게 나타난다. 풍상 측에 위치한 4개 지점(left panel)의 2014년 1월 평균 56.6 μg/m<sup>3</sup>로 나타났으며 에어로졸 feedback 효과에 따른 일누적 일사량 감소는 평균 1.92 MJ/m<sup>2</sup>로 나타났다. 지점별로 살펴보면, 서울은 1월 평균 PM<sub>10</sub> 농도가 47.5 μg/m<sup>3</sup>로 나타났으며, 일누적 일사량은 1월 평균 11.69 MJ/m<sup>2</sup>(NFB)에서 9.77 MJ/m<sup>2</sup>(NFB)로 1.92

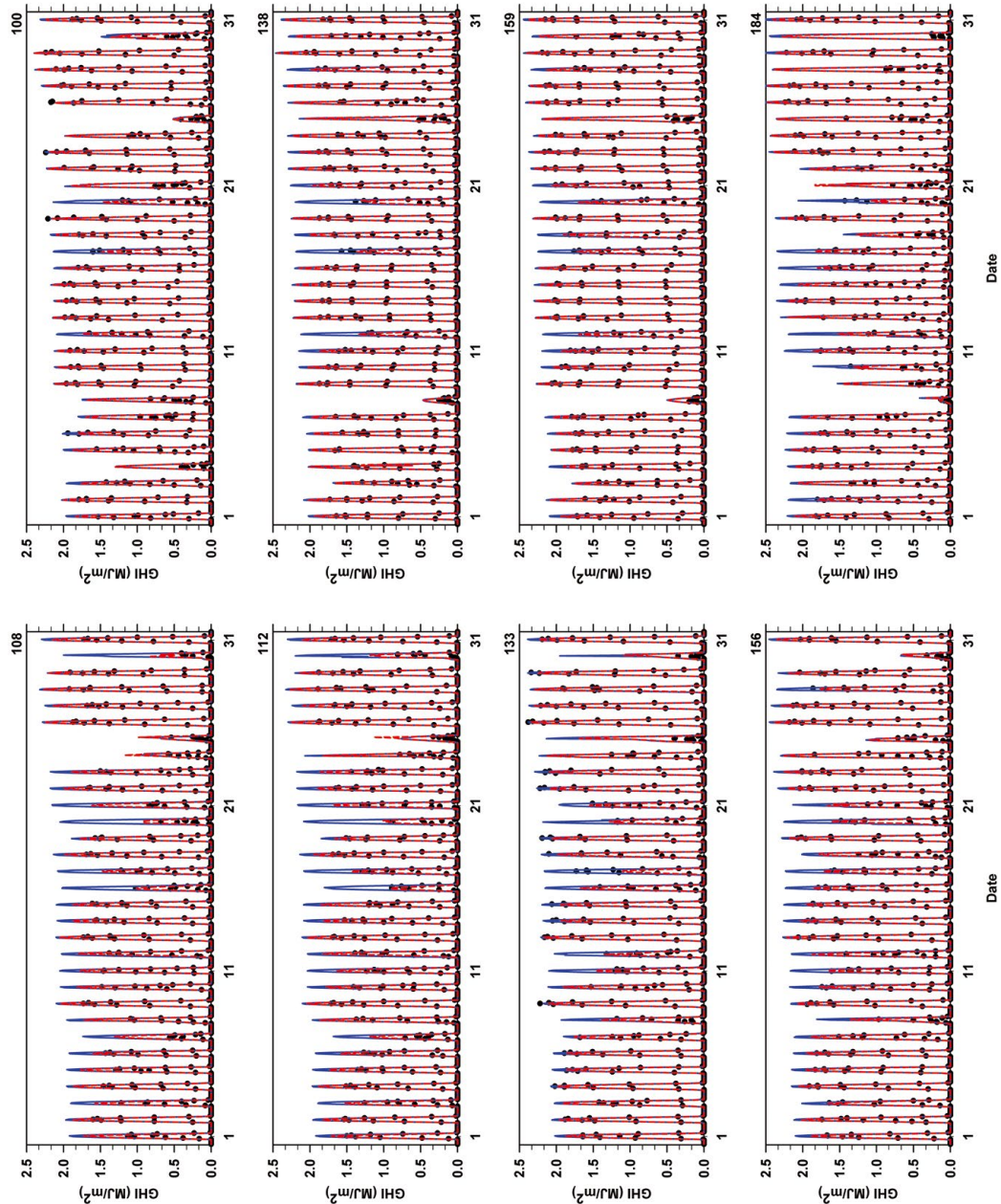


Fig. 5. Time series of GHI (Global Horizontal Irradiation) at 108 (Seoul), 112 (Incheon), 133 (Daegjeon), 156 (Gwangju), 100 (Gwangju), 138 (Daegwanryeong), 159 (Pohang), 184 (Jeju) stations from observation (black circles), NFB (blue line) and FB (red line) for January in 2014.

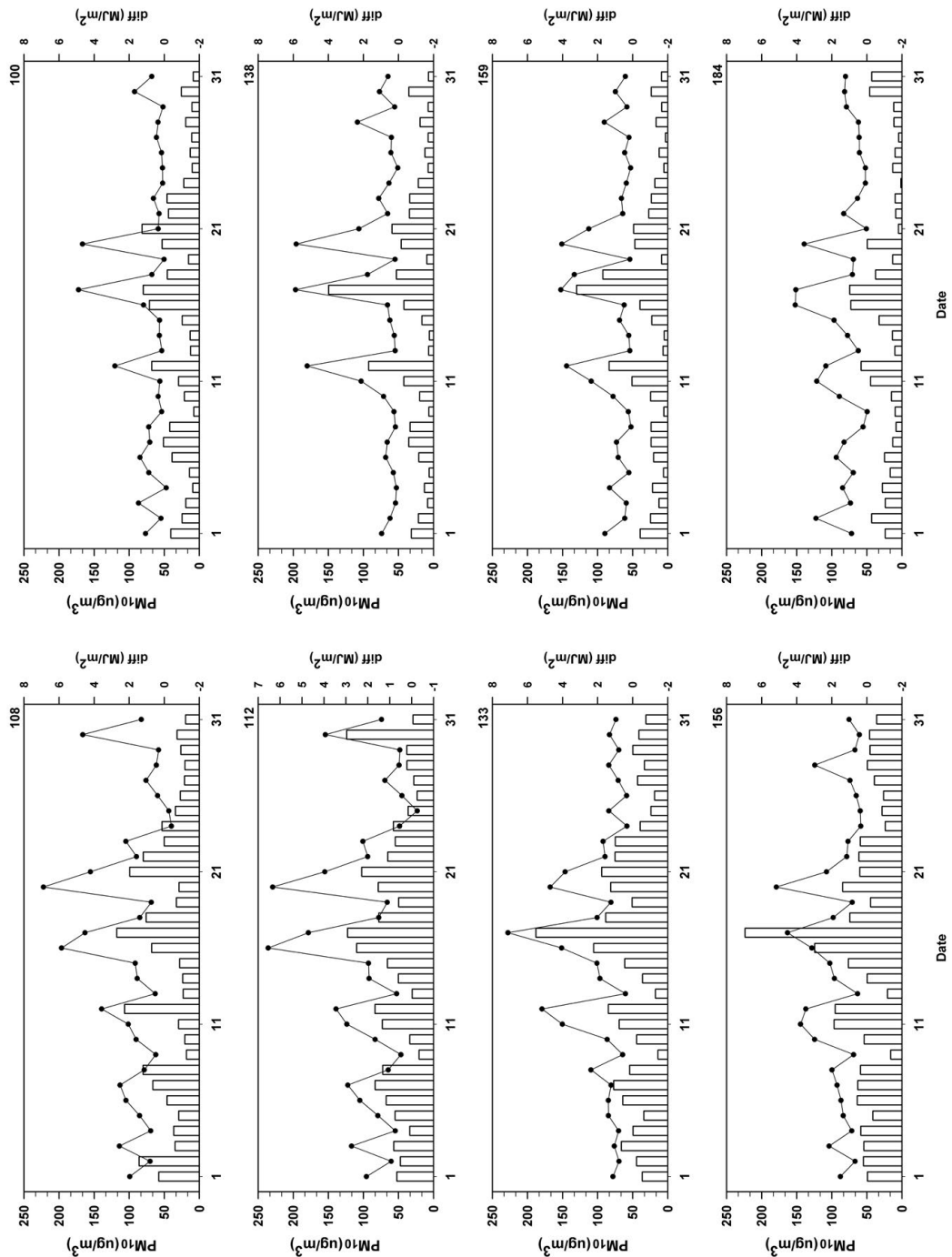


Fig. 6. Simulated daily mean PM<sub>10</sub> concentration (bar, left axis) of FB and differences between NFB and FB for daily GHI (line, right axis) at 108, 112, 133, 156, 100, 138, 159, 184 stations for January in 2014.

MJ/m<sup>2</sup>로 에어로졸 feedback 효과에 의해 일누적 일사량이 16%로 감소하였다. 다른 지점들도 일누적 일사량이 감소했으며 인천 2.07 MJ/m<sup>2</sup> (60.4 µg/m<sup>3</sup>), 대전 1.91 MJ/m<sup>2</sup> (57.8 µg/m<sup>3</sup>), 광주 1.77 MJ/m<sup>2</sup> (60.7 µg/m<sup>3</sup>)로 나타났다.

제주 및 풍하 측 4개 지점(right panel)은 평균 PM<sub>10</sub> 농도 28.6 µg/m<sup>3</sup>, 일사량 감소는 평균 1.13 MJ/m<sup>2</sup>로 나타났다. 지점별 일누적 일사량 감소량(평균 PM<sub>10</sub> 농도)은 대관령 0.88 MJ/m<sup>2</sup> (31.4 µg/m<sup>3</sup>), 포항 1.19 MJ/m<sup>2</sup> (29.3 µg/m<sup>3</sup>), 부산 1.12 MJ/m<sup>2</sup> (28.6 µg/m<sup>3</sup>), 제주 1.31 MJ/m<sup>2</sup> (25.2 µg/m<sup>3</sup>)로 나타났다. 결과적으로 풍상 측 지점들이 풍하 측 지점들에 비해 월평균 PM<sub>10</sub> 농도가 높았으며 그 영향으로 에어로졸의 feedback 효과가 더 크게 나타난 것으로 판단된다.

그러나 서울과 대전의 경우 광주에 비해 PM<sub>10</sub> 농도는 낮지만 일사량 감소가 더 크게 나타났다. 자료 획득의 어려움으로 인해서 PM을 구성하는 성분별 관측 농도에 대한 추가적인 분석은 하지 못했지만, 에어로졸의 feedback 효과가 성분별로 차이가 나기 때문인 것으로 판단된다. IPCC (2007) 보고서에 따르면, SO<sub>4</sub><sup>-</sup> -0.4±0.2 W/m<sup>2</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> -0.1±0.1 W/m<sup>2</sup>, OC -0.05±0.05 W/m<sup>2</sup>, BC +0.20±0.15 W/m<sup>2</sup>, 광물성 먼지(mineral dust) -0.1±0.2 W/m<sup>2</sup>로 물질별 에어로졸의 직접 효과에 의한 영향을 분석하였다. 따라서 비슷한 수준의 에어로졸이 분포하더라도 에어로졸의 성분 구성에 따라 에어로졸의 feedback 효과가 지역별로 차이가 나타날 수 있음을 의미한다.

### 3.4 통계 분석

에어로졸의 feedback 효과를 정량적으로 파악하기 위해서 수치모의 기간인 2014년 1월의 수치모의 결과와 기상청 ASOS 22개 관측지점의 일누적 일사량에 대해 통계 분석을 실시하였다. 본 연구에서 사용된 통계 지수는 MB (Mean Bias), RMSE (Root Mean Square Error), rRMSE (relative Root Mean Square Error), R<sup>2</sup> (Correlation coefficient), IOA (Index Of Agreement)이다. 표 1에 나타난 바와 같이 MB가 양의 값으로 나타나 두 실험 모두 관측보다 과대모의하는 경향이 나타난다. 그러나 에어로졸의 효과를 고려함으로써(FB) 평균 1.61 MJ/m<sup>2</sup>, MB 1.6 MJ/m<sup>2</sup>, RMSE는 1.45 MJ/m<sup>2</sup> 감소를 보이며 과대모의하는 경향이 다소 완화되는 것을

**Table 1. Statistics for the daily GHI between of FB and NFB for January in 2014.**

	NFB	FB
Avg. (OBS = 8.91 MJ/m <sup>2</sup> )	12.48	10.87
MB (MJ/m <sup>2</sup> )	3.57	1.97
RMSE (MJ/m <sup>2</sup> )	4.13	2.68
rRMSE (%)	47.58	30.75
R <sup>2</sup>	0.61	0.72
IOA	0.59	0.73

확인할 수 있다. 특히 rRMSE 감소가 17%p로 나타나 일사량 예측 정확도가 크게 향상된 것을 알 수 있으며, R<sup>2</sup>와 IOA가 0.1 이상 향상되어 변화 경향성 또한 FB 실험이 잘 예측하였다. 결과적으로 에어로졸의 feedback 효과를 고려함으로써 과대모의되던 일사량 수치모의 결과가 완화되고 정확도 개선에 효과가 있음을 확인하였다.

### 3.5 rRMSE 수평분포 분석

그림 7은 에어로졸의 feedback 효과를 지역별로 분석하기 위해 기상청 ASOS 22개 관측 지점에서의 일누적 일사량의 rRMSE를 나타낸 것이다. 한반도 전체적으로 FB와 NFB 실험의 차이는 약 10~30%로 지역별로 편차가 크게 나타났다. 지점별로 살펴봤을 때 풍상 측 지역의 경우 서울 108 (약 30%p), 인천 112 (약 30%p), 대전 133 (약 15%p), 광주 156 (약 18%p) 지점에서 에러감소율이 크게 나타나 에어로졸의 직접 효과가 뚜렷하게 나타났다. 반면 제주 184 (약 12%p)와 대관령 100 (약 10%p), 포항 138 (약 11%p), 부산 159 (9%p) 지점과 같이 풍하 측에 위치한 지역은 상대적으로 낮은 에러감소율을 보였다. 이는 앞선 편서풍의 풍상 측에 위치한 한반도 서쪽 지역과 배출원이 밀집해 있는 도심 지역을 중심으로 고농도의 PM<sub>10</sub>이 나타나는 지역에서 에어로졸의 feedback 효과가 크게 나타나기 때문이다.

물론 에어로졸의 feedback 효과를 고려했지만 일사량 수치모의 정확도 개선의 여지는 여전히 존재한다. 이는 모델 최종 도메인의 수평 해상도가 9km로 관측 지점의 지형 특성을 나타내기에는 부족한 점이 있으며, 이로 인해서 발생하는 지형성 강우와 같은 지역 및 지리적 특성을 정확하게 모의하지 못하기 때문이다. 그러나 이러한 문제점에도 불구하고 결과적으로 에어



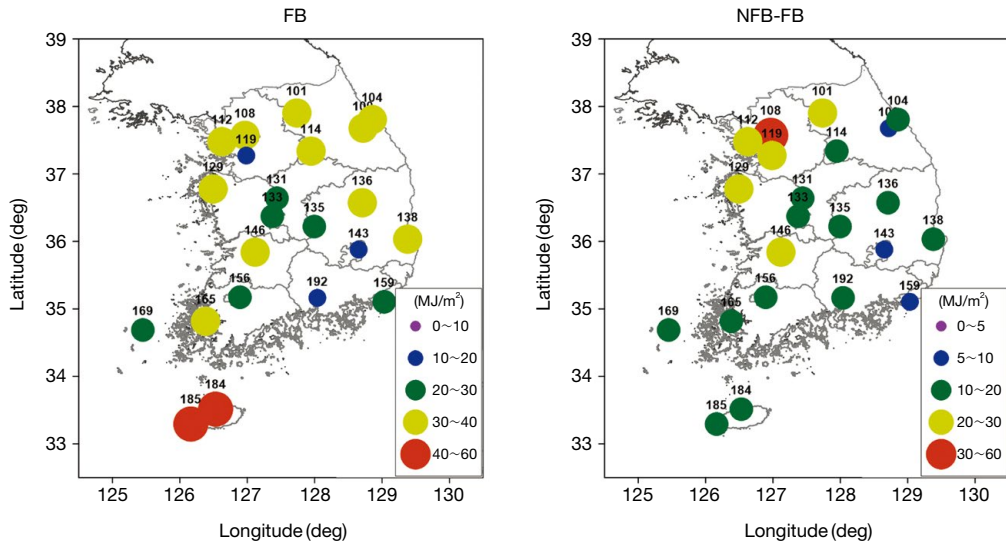


Fig. 7. Horizontal distributions of the rRMSE values of FB (left) and its differences between NFB and FB (right) at 22 KMA sites for January in 2014.

로졸의 feedback 효과를 고려함으로써 평균 17%p의 에어로졸이 나타나 일사량 정확도 개선에 크게 기여할 수 있음을 보였다. 또한, 본 결과는 2014년 1월 전체 수치를 평균한 결과이며, 일평균 PM<sub>10</sub> 농도가 80 μg/m<sup>3</sup> 이상으로 나타나는 기간(총 10일)에 대해 분석한 결과 평균적으로 34%p 개선되어 고농도 사례에 개선 효과가 더 크게 나타남을 확인하였다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 한반도를 대상으로 2014년 1월에 대해 에어로졸의 직접 효과를 고려한 WRF-CMAQ 결합 모델을 이용해 에어로졸 feedback 효과에 의한 지표면 일사량 변화를 살펴보았다. CMAQ 대기질 수치모의 결과, 2014년 1월 평균 PM<sub>10</sub> 수평분포가 서해안을 중심으로 하는 한반도 서쪽 지역에서 상대적으로 고농도로 나타나 제주를 포함한 한반도 동쪽 지역과는 차이가 나타났다. 이러한 PM<sub>10</sub> 농도의 지역적 분포 차이는 에어로졸의 feedback 효과에 의한 누적 일사량 분포에서도 잘 나타났다. 에어로졸의 feedback 효과를 고려한 FB 실험에서 고려하지 않은 NFB 실험에 비해 10~80 MJ/m<sup>2</sup> 정도의 월누적 일사량 감소가 나타났다. 특히

한반도의 서쪽 지역이 동쪽보다 일사량 감소폭이 더 크게 나타났는데, 이러한 지역적 차이는 평균 PM<sub>10</sub> 농도 분포에서도 유사하게 나타났다. 이는 대도시 중심의 배출량 분포 특성과 편서풍 계열 바람에 의해 중국에서 넘어오는 PM<sub>10</sub>을 포함한 에어로졸의 장거리 수송 영향으로 인한 지역적 특성으로 판단된다. 또한, 풍상 측 지점들(1.77~2.07 MJ/m<sup>2</sup>)과 풍하 측 지점들(0.87~1.31 MJ/m<sup>2</sup>)에서 에어로졸 feedback 효과에 따른 일사량의 감소 정도가 다르게 나타나 한반도 지역적 특성과 PM<sub>10</sub> 농도 분포에 따라 에어로졸의 feedback 적용 효과의 정도에 차이가 있음을 확인하였다. 누적 일사량 분석 결과에서도 지역별 차이가 나타났다. rRMSE를 분석했을 때, 서울, 인천, 대전, 수원과 같은 한반도 서쪽 풍상 측에 위치한 도심 지역이 대관령, 포항, 부산과 같이 한반도 동쪽 풍하 측에 위치한 지역보다 20%p 이상의 에어로졸을 나타나 에어로졸의 영향에 대한 일사량 변화가 지역적 차이가 있음을 정량적으로 확인하였다.

본 연구에서는 에어로졸의 feedback 효과를 알아보기 위해 에어로졸의 농도를 대신해 대기질 수치모의 결과 중 지표면 PM<sub>10</sub> 농도 결과를 바탕으로 분석을 실시하였다. 한반도의 복잡한 지형 모사와 이에 따른 지형성 강우와 같은 지역별 특징을 정확하게 모의하기에

는 본 연구결과의 수평 해상도가 낮다는 문제점이 있으며, 에어로졸의 직접 효과만을 고려한 결과로 에어로졸의 feedback 효과를 정확하게 표현하기에는 제약 및 불확실성을 포함하기 때문에 향후 WRF-CMAQ 결합 모델의 개발에 따라 추가적인 연구가 필요하다. 그러나 추후 겨울철뿐 아니라 다양한 사례와 지역적 특성에 따른 분석이 동반된다면 에어로졸의 영향 분석과 더불어 기상 및 대기질 수치모델의 정확도 개선에도 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업 (B7-2434)을 재원으로 수행한 연구과제의 결과입니다.

### References

- Bowden, J.H., T.L. Otte, C.G. Nolte, and M.J. Otte (2012) Examining interior grid nudging techniques using two-way nesting in the WRF model for regional climate modeling, *Journal of Climate*, 25, 2805-2823.
- Forkel, R., J. Werhahn, A.B. Hansen, S. McKeen, S. Peckham, G. Grell, and P. Suppan (2012) Effect of aerosol-radiation feedback on regional air quality - A case study with WRF/Chem, *Atmospheric Environment*, 53, 202-211.
- Hogrefe, C., G. Pouliot, D. Wong, A. Torian, S. Roselle, J. Pleim, and R. Mathur (2015) Annual application and evaluation of the online coupled WRF-CMAQ system over North America under AQMEII phase 2, *Atmospheric Environment*, 115, 683-694.
- Iacono, M.J., J.S. Delamere, E.J. Mlawer, M.W. Shephard, S.A. Clough, and W.D. Collins (2008) Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models, *Journal of Geophysical Research*, 113, D13103, doi:10.1029/2008JD009944.
- IPCC (2007) *Climate change 2007: The physical science basis*, Cambridge University Press, Cambridge and New York, 996pp.
- Jacob, D.J. and D.A. Winner (2009) Effect of climate change on air quality, *Atmospheric Environment*, 43, 51-63.
- Jacobson, M.Z., Y.J. Kaufmann, and Y. Rudich (2007) Examining feedbacks of aerosols to urban climate with a model that treats 3-D clouds with aerosol inclusions, *Journal of Geophysical Research*, 112(24), D24205, doi:10.1029/2007JD008922.
- Kong, X., R. Forkel, R.S. Sokhi, P. Suppan, A. Baklanov, M. Gauss, D. Brunner, R. Baro, A. Balzarini, C. Chemel, G. Curci, P. Jimenez-Guerrero, M. Hirtl, L. Hozak, U. Im, J.L. Perez, G. Pirovano, R. San Jose, K.H. Schlunzen, G. Tsegas, P. Tuccella, J. Werhahn, R. Zabkar, and S. Galmarini (2014) Analysis of meteorology-chemistry interactions during air pollution episodes using online coupled models within AQMEII phase-2, *Atmospheric Environment*, 115, 527-540.
- Koo, Y.S., S.T. Kim, H.Y. Yun, J.S. Han, J.Y. Lee, K.H. Kim, and E.C. Jeon (2008) The simulation of aerosol transport over East Asia region, *Atmospheric Research*, 90, 264-271.
- Thiebaut, J., E. Rogers, W. Wang, and B. Katz (2003) A new high-resolution blended real-time global sea surface temperature analysis, *Bulletin of the American meteorological Society*, 84(5), 645-656.
- Werner, M., M. Kryza, A.C. Skjøth, K. Wałaszek, A.J. Dore, and H. Ojrzynska (2016) Aerosol-radiation feedback and PM<sub>10</sub> air concentrations over Poland, *Pure and Applied Geophysics*, 174(2), 551-568, doi:10.1007/s00024-016-1267-2.
- Wong, D.C., J. Pleim, R. Mathur, F. Binkowski, T. Otte, R. Gilliam, G. Pouliot, A. Xiu, J.O. Young, and D. Kang (2012) WRF-CMAQ two-way coupled system with aerosol feedback: software development and preliminary results, *Geoscientific Model Development*, 5, 299-312.
- Zhang, Y. (2008) Online coupled meteorology and chemistry models: history, current status, and outlook, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 2895-2932.